

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/299436953>

Monitoraggio microclimatico: passato, presente e prospettive future

Chapter · December 2015

CITATIONS

3

READS

2,519

3 authors:



[Maria Sileo](#)

Italian National Research Council

96 PUBLICATIONS 888 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Fabrizio Terenzio Gizzi](#)

Italian National Research Council

151 PUBLICATIONS 1,020 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Nicola Masini](#)

Italian National Research Council

381 PUBLICATIONS 5,850 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Monitoraggio microclimatico: passato, presente e prospettive future

Maria Sileo, Fabrizio Terenzio Gizzi, Nicola Masini

Riassunto

Il monitoraggio microclimatico è uno strumento applicato da più di quarant'anni per determinare l'impatto dei fattori ambientali, naturali e artificiali, che agiscono congiuntamente sul Patrimonio Culturale. Questo lavoro vuole fornire una sintetica review sul monitoraggio microclimatico utilizzato come strumento per la conoscenza e conservazione del Patrimonio Culturale. Vengono illustrate le tecnologie adottate per monitorare i parametri fisici coinvolti nei processi di deterioramento dei materiali costituenti i beni Culturali mobili ed immobili. Inoltre si fa riferimento alle principali tecniche di analisi e monitoraggio di ambienti indoor e outdoor secondo le normative vigenti, applicate dal passato fino ad oggi su numerosi monumenti ed edifici storici, dall'iniziale applicazione fino allo sviluppo di nuovi sensori e tecniche di analisi.

1 – Introduzione

Il monitoraggio microclimatico è uno degli strumenti principali per la valutazione e diagnosi del degrado materico e, conseguentemente, per la conoscenza e conservazione del Patrimonio Culturale. Esso deriva, in particolare, da uno sviluppo tecnico-conoscitivo maturato in aree scientifiche differenti ascrivibili soprattutto alle scienze naturali, fisica dell'atmosfera e meteorologia (Camuffo, 2014).

La necessità di monitorare i parametri ambientali è nata negli anni Settanta principalmente dalla stringente esigenza di tutelare i beni mobili preservati in ambito museale (Thompson, 1978). In seguito, il monitoraggio di ambienti confinati è stato esteso sia al Patrimonio architettonico costruito sia alle architetture "in negativo" (Camuffo, 1998).

Da un punto di vista applicativo il monitoraggio microclimatico rappresenta oggi un'imprescindibile pratica preventiva poiché consente di valutare e prevedere le interazioni tra oggetto, nella sua accezione materica, e ambiente.

Tra i primi ricercatori ad occuparsi di monitoraggio ambientale correlato alla tutela e salvaguardia dei beni artistici mobili museali ricordiamo Thompson (1978, 1986), il quale redasse le teorie museologiche della conservazione preventiva, che rappresentano una prima trattazione sistematica ancora oggi scientificamente valida per chi valuta, in particolare, il rapporto tra conservazione e microclima, con specifico riguardo alle condizioni microclimatiche di conservazione in ambiente confinato.

Dagli anni Ottanta sono state avviate diverse attività di ricerca in Italia incentrate sullo studio del microclima in rapporto alla conservazione dei Beni culturali, sia attraverso studi di monitoraggio *indoor* di musei, chiese ed edifici storici ospitanti opere d'arte, sia in ambienti *outdoor* accoglienti monumenti di elevata valenza architettonica (Camuffo, 1983 e 1998).

Un contributo scientifico rilevante è rappresentato dalla monografia di Camuffo (1998) che offre un apporto conoscitivo fondamentale per una corretta formulazione e pianificazione delle azioni dedicate alla conservazione dei Beni culturali. L'opera è dedicata, in particolare, ai restauratori e specialisti in chimica, architettura, ingegneria, geologia e biologia operanti nel settore della conservazione.

Nel secondo volume di recente pubblicazione (Camuffo, 2014) l'Autore aggiorna e amplia i contenuti scientifici e tecnologici e inserisce i nuovi orientamenti verso la standardizzazione imposta dal Comitato Europeo di Normalizzazione (CEN) per la conservazione del Patrimonio Culturale.

Partendo da questo breve quadro conoscitivo sinottico circa il monitoraggio microclimatico, in questo lavoro si discuteranno le principali cause del degrado, dei relativi parametri di controllo che è possibile monitorare considerando e rivisitando i principali studi condotti negli ultimi anni sulla tematica.

Successivo aspetto che sarà affrontato è quello riguardante le future prospettive di sviluppo tecnologico della sensoristica da utilizzare nel campo della conservazione dei Beni culturali.

A tal proposito saranno illustrati gli esiti di uno studio pilota condotto dall'IBAM-CNR nell'ambito del Progetto PRO_CULT, all'interno della tematica *"Tecniche innovative per il monitoraggio del degrado materico del patrimonio architettonico e monumentale"*.

2 – Le cause del degrado ed il monitoraggio microclimatico

Le cause del degrado dei Beni culturali sono strettamente correlate all'ambiente nel quale l'oggetto di valenza storico-artistica-architettonica è ubicato.

L'interazione ambiente-materia determina il raggiungimento, nel tempo, di uno stato di equilibrio che il più delle volte è sfavorevole ad una corretta conservazione.

Da un punto di vista storico, l'acceleramento dei processi di degrado si è avuto con la Rivoluzione industriale per l'aggiunta di nuove cause di origine antropica che hanno condotto ad un sostanziale peggioramento della qualità dell'aria e dell'ambiente specie dopo gli anni Sessanta del secolo scorso. Il deterioramento della qualità dell'aria, determinata dalle intense emissioni gassose derivanti da attività antropiche di differente origine, ha provocato l'introduzione nell'ambiente di numerose componenti pericolose per la conservazione del Patrimonio Culturale, con particolare riguardo a quei beni che sono direttamente esposti all'azione degli agenti atmosferici.

Dal punto di vista del degrado materico, i gas inquinanti più pericolosi immessi in atmosfera sono l'SO_x e l'NO_x. Tali inquinanti danno luogo, in particolari condizioni, alla formazione di acidi aggressivi (solforico e nitrico) per i materiali lapidei sia naturali sia artificiali a composizione carbonatica come il marmo, le pietre calcaree e gli intonaci. Alle polveri aero-disperse si è aggiunta, inoltre, la presenza di polveri sottili (aerosol) carboniose che rappresenta la causa del progressivo annerimento delle superfici direttamente esposte all'azione degli agenti esogeni. Tali particelle, insieme ai sali solubili (ad es. gesso e nitrati), possono dare origine, in determinate condizioni, alla formazione di croste nere, molto diffuse su numerosi monumenti anche ben noti come

la colonna Traiana oppure l'Altare della Patria a Roma (Camuffo, 1993 e 1994).

Fattori di tipo *fisico, chimico e biologico* governano, quindi, l'interazione tra i materiali e l'ambiente, producendo molteplici effetti di degrado materico come alterazioni morfologiche (perdita di materia, deformazione, fessurazione), fisico-meccaniche (diminuzione delle caratteristiche di coesione e adesione ed elasticità), chimico-fisiche (variazione della porosità, ecc.) e delle proprietà ottiche (colore, lucentezza).

Tra i fattori di natura fisica si annoverano le azioni meccaniche di disgregazione e frammentazione dovute, ad esempio, alla cristallizzazione di sali o ai cicli di gelo-disgelo in presenza di acqua nei materiali, alla dilatazione-contrazione per variazione della temperatura o per irraggiamento, all'azione del vento che in presenza di particolato in sospensione causa abrasione delle superfici lapidee.

Per gli ambienti interni i meccanismi di tipo fisico sono riconducibili direttamente alle caratteristiche della struttura muraria del bene che può favorire variazioni di temperatura e di umidità, costituendo talora un grave rischio per i beni che s'intende preservare. Le variazioni termo-igrometriche, infatti, determinano dilatazioni e contrazioni ma anche fenomeni di evaporazione, condensazione e migrazione di acqua e sali. Tra i fattori di controllo fisico del degrado, il fenomeno della condensa è particolarmente temuto poiché l'umidità che si forma in tali circostanze sulle superfici fredde è in grado di veicolare in soluzione sali e gas, rendendo più veloce l'interazione di questi con i materiali costitutivi delle opere d'arte.

Altri fattori fisici che determinano problemi di degrado sui Beni culturali posti in ambienti esterni o *outdoor*, sono la pioggia battente, l'insolazione, le soluzioni saline e il vento, ma decisivi soprattutto per l'analisi di ambienti *indoor* sono la temperatura e l'umidità dell'aria, parametri fondamentali quando è necessario monitorare particolari ambienti come musei o edifici storici, contenitori di opere d'arte.

Tra gli agenti fisici, le variazioni di temperatura ed umidità possono determinare *stress* degradativi significativi in quasi tutti i materiali, soprattutto quando le fluttuazioni delle condizioni ambientali al contorno avvengono in tempi estremamente rapidi.

La temperatura è un fattore importante per la conservazione dei Beni Culturali poiché regola fenomeni di tipo meccanico come la dilatazione-contrazione, chimico-mineralogici come la solfatazione o la formazione di croste nere e patine biologiche che condizionano la disgregazione fisica e decomposizione o trasformazione chimica del substrato da parte degli organismi viventi. Ad esempio, molto pericolosi sono i cambiamenti ciclici di temperatura come quelli che occorrono giornalmente per fenomeni di gelo/disgelo o quando un oggetto è sottoposto ad esposizione diretta ai raggi solari in condizioni *outdoor* (Camuffo *et al.*, 1984). Per tali ragioni le variazioni di temperatura sia giornaliere sia stagionali sono determinanti per lo stato di conservazione dei materiali dei Beni Culturali.

L'effetto termico sul degrado dei materiali è da considerare, peraltro, congiuntamente ai vari effetti causati dalla presenza di umidità ed acqua il cui stato fisico dipende in modo inversamente proporzionale dalla temperatura. Anche la mobilitazione dell'acqua per evaporazione, la migrazione di sali all'interno dei materiali e la formazione di efflorescenze sono condizionate dalle variazioni di temperatura.

Riguardo i fattori chimici, i principali fattori come il clima, l'acqua, la temperatura e a volte la presenza di sali, inquinanti e biodeteriogeni possono determinare modificazioni della composizione chimico-mineralogica del materiale a causa della formazione di processi di idratazione, idrolisi, dissoluzione, carbonatazione, ossidazione, solfatazione ecc. Gli effetti di tali processi producono forme di degrado come la polverizzazione, la disgregazione, la variazione cromatica, la formazione di croste nere e la corrosione.

Per quanto attiene i fattori di matrice biologica, essi sono associati all'azione di biodeteriogeni come licheni, funghi, alghe, batteri, vegetazione, ecc. La presenza di biodeteriogeni può determinare, a sua volta, alterazioni di tipo chimico e/o fisico-meccanico che possono intensificarsi o evolversi in concomitanza dei cambiamenti stagionali e/o in funzione delle attività antropiche (es. pressione turistica, inquinamento atmosferico, riscaldamento/raffreddamento forzato di ambienti confinati, ecc.). Anche in questo caso, la temperatura è un parametro chiave insieme all'umidità e all'illuminazione, nel determinare l'*habitat* e

il controllo del metabolismo dei biodeteriogeni. A temperature inferiori a 0°C, infatti, i microorganismi non riescono a sopravvivere, sopra il punto di congelamento e fino a 20°C, i processi metabolici aumentano al crescere della temperatura. L'intervallo di temperatura dai 20 ai 30-35°C favorisce in modo particolare l'attività microbiologica, ma con valori superiori a 40°C lo sviluppo di biodeteriogeni diventa meno rilevante (Caneva, 1997; Sedlbauer, 2002; Sedlbauer *et al.*, 2011). La luce, inoltre, è un fattore limitante soprattutto per ambienti confinati per lo sviluppo di alcuni biodeteriogeni poiché, ad esempio, per gli organismi fotosintetizzanti come alghe licheni o piante, sono richieste condizioni d'illuminazione piuttosto elevate e persistenti nel tempo (Caneva, 1997).

Lo sviluppo dell'attività biologica è favorito, infatti, non tanto dal raggiungimento delle condizioni ambientali ottimali, ma dalla loro continuità nel tempo.

Per comprendere e valutare l'impatto di tutti i fattori ambientali, naturali e artificiali che agiscono congiuntamente sul Patrimonio Culturale è necessario ed opportuno, quindi, misurare i valori e le variazioni nel tempo dei diversi parametri coinvolti, cioè procedere a quello che è tradizionalmente noto come *monitoraggio*.

Il monitoraggio presuppone l'adozione di una varietà di sistemi tecnologici che permettano di acquisire i parametri ritenuti utili ad individuare le cause del degrado.

La scelta di eseguire un monitoraggio deve basarsi su una necessaria analisi a priori circa le patologie dell'oggetto da indagare, ma anche di quelle che sono le condizioni al contorno del bene in modo da valutarne opportunamente l'interazione con l'ambiente.

Le tecniche di monitoraggio disponibili differiscono in funzione del tipo di bene, dell'oggetto d'indagine, del luogo in cui il bene è conservato (o esposto) e del tipo di danno rispetto al quale si intendono valutare le cause agenti. In base a quelle che sono le finalità del monitoraggio si possono effettuare, quindi, monitoraggi strutturali, ambientali o di conservazione.

Nel caso, ad esempio, delle situazioni di degrado strutturale è possibile valutare l'evolversi nel tempo di un processo di

deterioramento attraverso la valutazione dei processi di *fracturing*, ecc.

Più diffuso è il monitoraggio ambientale *indoor* finalizzato alla conservazione del Patrimonio museale ed il monitoraggio climatico *outdoor* di monumenti posti in aree fortemente inquinate. Meno diffuso, ma di estrema utilità, è il monitoraggio finalizzato alla conservazione o valutazione della durabilità dei trattamenti di restauro.

3 - Il monitoraggio microclimatico applicato ai Beni Culturali in condizioni *indoor* ed *outdoor*

Il monitoraggio ambientale è ad oggi applicato in condizioni *outdoor*, soprattutto per il controllo degli inquinanti e per il monitoraggio microclimatico di contesti museali e per la conservazione di beni conservati *indoor* presso edifici storici, chiese, ecc..

Le condizioni climatiche ideali di conservazione di un bene vanno rapportate al tipo di materiale costitutivo dell'oggetto, all'ambiente in cui è esposto (condizioni *indoor* o *outdoor*) ed al tipo di degrado a cui è potenzialmente soggetto. Ogni tipo di manufatto, in relazione alla sua costituzione materica richiede, quindi, condizioni climatiche di conservazione che possono oscillare entro un determinato e specifico *range*.

Pertanto, per una corretta conservazione dei beni in ambito museale e soprattutto in ambito architettonico, è necessario monitorare parametri climatici quali temperatura, umidità, velocità del vento, radiazione solare, presenza di inquinanti, individuando situazioni di rischio e stabilendo delle soglie di attenzione e allarme al di sotto delle quali le condizioni per la conservazione siano ottimali.

Per gli ambienti *outdoor* non è possibile agire per abbassare le soglie di rischio, mentre negli ambienti *indoor* i parametri climatici possono essere controllati tramite sistemi di gestione della climatizzazione e del riscaldamento.

Nei musei, infatti, i sistemi di condizionamento dell'aria mantengono le condizioni climatiche nei *range* di sicurezza. Il problema delle soglie di allarme si pone invece in maniera

maggiore per il Patrimonio che si ritrova conservato in chiese ed edifici storici dove, a causa degli elevati costi non esistono impianti di climatizzazione e sistemi di monitoraggio per il controllo del microclima. La sensoristica di allarme per il rischio climatico in questi ambienti dovrebbe essere molto più diffusamente utilizzata, resa accessibile e progettata con differenti costi *standard* per salvaguardare le diverse tipologie di beni da conservare.

Studi circa l'identificazione degli *standard* concernenti la corretta conservazione del Patrimonio Culturale sono stati oggetto di molteplici lavori scientifici relativi almeno agli ultimi due decenni. In particolare, è stata data molta importanza all'ambiente museale ed alle diverse tipologie, in termini materici, dei beni mobili conservati e delle condizioni di rischio che determinano il degrado dei differenti materiali (Camuffo *et al.*, 1999; Camuffo *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2001; Camuffo *et al.*, 2002; Brimblecombe *et al.*, 1999; Baoying *et al.*, 2010).

4 - Normative di riferimento

Da un punto di vista normativo sono disponibili sia a livello nazionale sia a scala regionale numerosi documenti che regolano le procedure di monitoraggio microclimatico per la conservazione del Patrimonio Culturale. Per la conservazione nei musei è importante, infatti, valutare ed individuare nel dettaglio le dinamiche ambientali, le tipologie di materiali da conservare e i loro potenziali processi di degrado, i parametri da misurare e la strumentazione più adeguata.

Le fonti normative in vigore a livello nazionale sono riconducibili prevalentemente al Decreto Ministeriale 10 maggio 2001 che stabilisce gli *standard* e gli obiettivi di qualità dei musei, biblioteche ed archivi.

In Italia sono attualmente in vigore diverse norme UNI che regolamentano le condizioni climatiche di conservazione dei Beni culturali. Molte di queste norme stanno guadagnando anche una diffusione in ambito europeo (norme UNI-EN). Tra le importanti norme ad oggi in vigore ricordiamo:

- **UNI 10586:1997** - *Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti.*
- **UNI 10829:1999** - *Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.*
- **UNI EN 15757:2010** - *Conservazione dei Beni culturali - Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici.*
- **UNI EN 15758:2010** - *Conservazione dei Beni culturali - Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti.*
UNI EN 16242:2013 - *Conservazione dei Beni culturali - Procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra l'aria e i Beni culturali.*

In Tabella 1 sono riportati i valori consigliati per la conservazione di alcune tipologie di beni artistici in condizioni di clima stabile in conformità alle norme UNI prima elencate. Ovviamente le condizioni di comfort per gli utenti di edifici museali o edifici storici spesso contrastano con le esigenze di conservazione, per i quali è importante la stabilità delle condizioni ambientali. I valori ottimali a tale fine, identificati dopo numerosi *test* di laboratorio, sono quelli *raccomandati* al fine di garantire che gli oggetti da tutelare si trovino in condizioni lontane da soglie pericolose.

Per lo studio microclimatico aspetti fondamentali e significativi da considerare sono i cicli termici stagionali e diurni, l'assorbimento e/o emissione di vapore acqueo da parte delle pareti, la condensazione sulle pareti del vapore acqueo, l'identificazione delle zone in cui tali fenomeni si verificano più frequentemente, l'identificazione di eventuale stratificazione dell'atmosfera interna (ventilazione convettiva naturale, miscelazione dell'aria, traiettoria e/o stagnazione dell'aria esterna ed interna; trasporto degli inquinanti; tempo di permanenza dell'atmosfera interna) (Sedlbauer, 2002; Sedlbauer *et al.*, 2011).

A scala regionale tre sono le unità amministrative che hanno legiferato sulla materia. In Lombardia il D.G.R. 20 dicembre 2002 n.7/11643 ha stabilito il riconoscimento dei musei finalizzato ad

innalzare il livello della qualità dei servizi degli istituti museali lombardi, sulla base del raggiungimento dei requisiti minimi, tra i quali sono presenti quelli legati al monitoraggio ambientale delle sale espositive.

Materiali costituenti	Variabili						
	Temperatura dell'aria (°C)	Max Escursione termica giornaliera (°C)	UR dell'aria (%)	Max Escursione giornaliera dell'UR dell'aria (%)	Massimo valore di illuminazione (lux)	Max. quantità di radiazione ultravioletta (microV/lm) (Potenza/Lumen)	Massima dose annuale di Luce (Mlx h/anno)
Carta, stampe ecc.	18/22	1.5	18/22	6	50	75	0.2
Tessuti	19/24	1.5	30/50	6	50	75	0.2
Dipinti su tela, tempere ecc.	19/24	1.5	40/55	6	150	75	0.5
Mosaici, pietre, rocce, minerali, fossili.	15/25		20/60	10			
Pitture murali, affreschi, sinopie (staccate)	10/24		55/65				
Pitture murali a secco (staccate)	10/24	1.5	45/50		150	75	0.5

Tabella 1. Valori consigliati per la conservazione dei beni artistici in condizioni di clima stabile (Norme UNI, vedi testo)

In Emilia Romagna il D.G.R. n.309 del 3 marzo 2003 affida all'Istituto per i Beni Artistici, Culturali e Naturali della Regione Emilia-Romagna la verifica del rispetto e della progressiva applicazione degli standard microclimatici di conservazione.

Per quanto concerne la regione Toscana, la Delibera del Consiglio Regionale del 26 maggio 2004 n. 60 ha previsto una ricognizione dello stato dei musei sulla base del D.M. 2001. Inoltre, in data 11 novembre 2005 è stato sottoscritto un protocollo d'intesa MIBAC-Regione Toscana per promuovere presso l'intero sistema museale toscano un percorso di autovalutazione in riferimento ai criteri e agli *standard* dell'atto di indirizzo di funzionamento e sviluppo dei musei (D.M. 2001).

5 – Il monitoraggio microclimatico ieri e oggi

Una grande varietà di casi di studio si desume dalla letteratura sul monitoraggio microclimatico applicato alla salvaguardia e conservazione del Patrimonio Culturale, sia in condizioni *indoor* sia *outdoor*.

Numerosi sono i contributi scientifici relativi alla salvaguardia del Patrimonio Culturale mobile ubicato in grandi "contenitori" come musei, palazzi ed archivi (Brimblecombe *et al.*, 1999; Camuffo *et al.*, 1999; Camuffo *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2001; Camuffo *et al.*, 2002; Corgnati *et al.*, 2010; Gysels *et al.*, 2004; Baoying *et al.*, 2010).

Meno consistente è, invece, la letteratura scientifica relativa al monitoraggio microclimatico di strutture architettoniche che ospitano affreschi, graffiti, bassorilievi, ecc (Bernardi *et al.*, 2000; Cardinale *et al.*, 2002; Garcìa *et al.*, 2010).

Il monitoraggio applicato ad ambienti semi-confinati come cortili, logge e chiostri è poco diffuso. Si segnalano alcune esperienze nel campo del monitoraggio sia dei parametri ambientali sia degli inquinanti aerodispersi, come nel caso del "Cortile di Michelozzo" a Firenze (Nava *et al.*, 2010) o del Cimitero monumentale di Pisa (Mandrioli *et al.*, 2008).

Il monitoraggio applicato a monumenti *outdoor* è, invece, molto diffuso. In particolare in Italia molti studi sono stati esperiti sia per valutare l'impatto dei parametri ambientali sia per studiare l'influenza di fattori come la radiazione solare, la presenza di inquinanti, l'insorgenza di croste nere. Tra i casi di studio più noti ricordiamo "Il Cavallo di bronzo" di piazza San Marco a Venezia (Camuffo, 1980 e 1981; Camuffo *et al.*, 1985), la Torre di Pisa

(Camuffo *et al.*, 1999), il Battistero di Firenze (Ghedini *et al.*, 2011) e l'Ara Pacis in Roma (Camuffo *et al.*, 1996).

I parametri microclimatici sono monitorati attualmente tramite le indicazioni riportate nelle norme di unificazione nazionale ed europea (UNI e UNI-EN) entrate in vigore in un arco cronologico compreso tra la fine degli anni Novanta fino ad anni più recenti.

Prima di tali norme, ed in particolare negli anni Ottanta, la strumentazione disponibile consentiva un monitoraggio di tipo diretto, cioè gli strumenti di rilevamento di temperatura ed umidità erano utilizzati in maniera differenziale, spostandoli da ciascun punto di campionamento a quello successivo, in modo da evitare errori di intercalibrazione e le misure erano successivamente ripetute nel tempo, rispettando le iniziali posizioni di acquisizione. Tale metodo non consentiva una caratterizzazione dell'ambiente ma solamente una valutazione dei parametri al momento del rilevamento.

Successivamente, con lo sviluppo di sistemi di monitoraggio indiretto, si è proceduto all'acquisizione dei dati tramite *data logger*, alla temporizzazione dei rilevamenti su sensori fissi lasciati in loco ad acquisire, ed alla trasmissione in remoto dei dati senza l'utilizzo di cablatura.

Con tali evoluzioni tecnologiche oggi è possibile disporre di una continuità temporale dei rilevamenti e pertanto il monitoraggio è diventato uno strumento diagnostico in grado di consentire l'analisi dell'evoluzione dei parametri ambientali e di fare previsioni a breve e lungo termine circa le situazioni di rischio.

Il continuo interesse verso la conservazione dei Beni culturali, infatti, ha consentito negli ultimi trent'anni uno sviluppo tecnologico specie in termini di sensoristica, per la rilevazione dei parametri fisici.

I valori di temperatura superficiale sulle pareti erano inizialmente misurati attraverso strumentazione di termovisione IR (Bernardi e Camuffo, 1995) e successivamente attraverso termistori a contatto.

La temperatura e l'umidità relativa di ambienti interni ed esterni erano pertanto misurate, in un primo momento, con speciali radiosonde ad alta risoluzione per la bassa atmosfera. Dagli anni 1999-2001 si è passati all'utilizzo di psicrometri elettronici ad alta

precisione (Camuffo *et al.*, 1999; Camuffo *et al.*, 2000; Bernardi *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2001). A partire dagli anni Novanta l'evoluzione della sensoristica è stata accompagnata da un notevole sviluppo dei sistemi di raccolta dati. Come visto precedentemente, infatti, in un primo momento il monitoraggio era possibile solamente attraverso misure dirette, che andavano ripetute nel tempo e che necessitavano della presenza di un operatore.

Il metodo fu originariamente concepito per la valutazione delle condizioni degli ambienti interni (Camuffo, 1983) per studiare le aree a rischio, identificando le cause e gli effetti del degrado. Il metodo diretto è stato applicato in molte circostanze sia in condizioni di ambiente confinato sia in ambiente esterno (Camuffo e Schenal, 1982; Bernardi *et al.*, 1985; Bernardi e Camuffo, 1995a, 1995b; Camuffo, 1986, 1991, 1994; Camuffo e Bernardi 1988, 1991a, 1991b, 1993, 1995a, 1995b, 1996, 1997).

In seguito allo sviluppo dei primi *data logger*, numerosi studi sono stati compiuti (Bernardi e Camuffo, 1995; Camuffo e Bernardi, 1997; Camuffo *et al.*, 1999; Bernardi *et al.*, 2000; Colston *et al.*, 2001; Camuffo *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2001; Camuffo *et al.*, 2002; Cardinale e Ruggiero, 2002; Camuffo *et al.*, 2002; Gysels *et al.*, 2004; Sawdy & Price, 2004; Liu *et al.*, 2010; Nava *et al.*, 2010; Becherini *et al.*, 2010; Corgnati & Filippi, 2010; Zarzo *et al.*, 2011; Ponziani *et al.*, 2012).

Tali studi sono stati sviluppati utilizzando sensoristica classica abbinata a *data logger* con i quali è stato possibile programmare il numero di misure giornaliere ed immagazzinare grandi volumi di dati.

Questa configurazione permette di immagazzinare i dati per un arco temporale che dipende dallo *step* di acquisizione e dal numero di sensori collegati al singolo *data logger*. Necessariamente, quindi, i dati rilevati dovevano essere periodicamente scaricati da parte di un operatore, e in seguito elaborati. Tale procedura consentiva, pertanto, di passare dal sistema di monitoraggio diretto ad un sistema semi indiretto, in cui la strumentazione era posizionata in maniera fissa durante il monitoraggio e i dati si acquisivano tramite *data logger*.

L'evoluzione riguardante l'ultimo decennio, sia in termini tecnologici sia procedurali, consente oggi che le singole

misurazioni siano trasmesse "in diretta" ad una stazione di gestione e controllo dei dati, tramite un collegamento sensori - *data logger* in remoto (Camuffo *et al.*, 2004) o tramite *data logger* automatici collegati con un sistema di trasmissione dei dati GSM (Bernardi *et al.*, 2006).

Tale avanzamento tecnologico ha consentito che la trasmissione dei dati avvenga in tempo reale via rete mobile. Vantaggio di questa procedura risiede anche nel fatto che la visione *real-time* dei dati e la gestione in remoto consente di verificare il corretto funzionamento di tutti i dispositivi (sensori) e di modificare la temporizzazione del rilevamento se necessario, limitando o eliminando la perdita di dati (Bernardi *et al.*, 2006).

Gli ultimi sviluppi tecnologici riguardano i nuovi sensori senza fili, cioè in grado di rilevare i parametri e di trasmetterli in tempo reale tramite segnale *wireless* ad una stazione posta ad alcuni metri di distanza (Angelini *et al.*, 2010), senza l'utilizzo di *data logger*.

La tendenza per i futuri sistemi di monitoraggio ambientale è sicuramente orientata verso la miniaturizzazione della sensoristica e lo sviluppo di nuovi sistemi di trasmissione e gestione dei dati.

La scelta delle diverse tecnologie da utilizzare per il monitoraggio dei Beni culturali non è così scontata ad oggi in quanto si deve tener conto non solo delle caratteristiche minime dei sensori ma, ovviamente, anche dei costi. Pertanto l'innovazione tecnologica non sempre è preferita quando implica elevati costi di acquisto e manutenzione, perciò ad oggi il monitoraggio microclimatico non è molto diffuso ma è applicato principalmente in grandi contesti museali e non alla piccola scala su monumenti di minore interesse.

Per ovviare a ciò e rendere applicabile il monitoraggio ambientale ad un numero sempre maggiore di casi e con costi accessibili, all'interno del Progetto PRO_CULT è stato sviluppato un sistema di monitoraggio *low cost* costituito da sensoristica di media risoluzione collegata a piattaforme hardware open source (sistema Arduino) facilmente utilizzabile e riconfigurabile.

Tali tecnologie, ad oggi, sono state sperimentate per il monitoraggio microclimatico degli Affreschi della Cripta di San Francesco d'Assisi ad Irsina (MT), ed i risultati riportati nel

presente volume (si veda *Approcci low-cost al monitoraggio microclimatico di ambienti confinati: il caso della Cripta di S. Francesco in Irsina (Matera), infra*).

6 – Il monitoraggio microclimatico di ambienti indoor: parametri e strumenti da utilizzare

I parametri fondamentali che è necessario monitorare quando si intende analizzare il microclima di aree interne ed esterne sono la temperatura, l'umidità relativa, l'illuminazione, la velocità dell'aria (interna) o del vento (in esterno), la quantità di pioggia e la presenza di inquinanti (per l'esterno).

Generalmente in ambienti confinati si verifica una stratificazione naturale dell'aria che è perturbata dall'azione di sistemi di condizionamento o dalla presenza o movimento delle persone presenti.

Per mantenere nel tempo lo stesso equilibrio è auspicabile che l'edificio abbia pareti spesse, come nella maggior parte degli edifici storici, così da permettere una elevata inerzia termica, condizione tipica per la stratificazione termica.

Le pareti molto spesse sono efficaci infatti nel ridurre i cicli di temperatura giornalieri e anche, in misura minore, il ciclo di variazione stagionale, in modo che il microclima interno tende naturalmente a diventare omogeneo, scarsamente dipendente dalle fluttuazioni giornaliere e dalle condizioni metereologiche.

Per quanto riguarda la sensoristica da utilizzarsi per misurare i parametri temperatura ed umidità, la loro scelta è un compito molto delicato in quanto le superfici da analizzare sono pregiate, vulnerabili e sempre esposte al rischio di danneggiamento quando sono manipolate.

Anche se i sensori possono essere gli stessi che sono utilizzati in altri settori come ad esempio in meteorologia, agricoltura, industria, ecc., l'utilizzo e le caratteristiche di performance sono differenti. Esistono diverse norme specifiche per la conservazione dei Beni culturali come ad esempio le UNI EN 15758: 2010 e UNI EN16242:2013 che regolamentano le procedure ed i metodi di misura della temperatura e dell'umidità dell'aria. In tali norme

sono riportate le tipologie di sensori utilizzabili per le misure e le caratteristiche minime che tali sensori devono soddisfare.

In particolare, per la misurazione della temperatura (UNI EN 15758: 2010), è possibile adottare tre tipologie di sensori:

- *sensori a contatto*, posti in contatto fisico con l'oggetto rilevato;
- *sensori a sfioramento* posizionati in prossimità della superficie, ma senza alcun contatto fisico con esso;
- *sensori di temperatura remoti* o a *infrarossi*, con lo strumento situato a distanza di sicurezza dalla superficie.

Ovviamente è preferibile evitare o limitare il contatto diretto con le opere d'arte, ma ciò non sempre è possibile.

Nel primo caso le misurazioni vengono eseguite solitamente a contatto diretto con la pietra, vetro, metalli o su legno oppure ad esempio su superfici ripristinate vicine agli affreschi, in quanto il contatto con l'oggetto seppur ottenuto utilizzando adesivi o colle rimuovibili, può produrre danni irreversibili agli oggetti.

Gli altri metodi meno invasivi sono basati sulla misurazione dell'emissione termica IR dei corpi e sono condizionati dalla emissività della superficie del materiale in esame. Sensori a sfioramento costituiscono una valida alternativa ai sensori a contatto, salvo nel caso di metalli lucidati.

Sebbene i sensori a sfioramento rilevino la radiazione totale (cioè radiazione diretta e diffusa) emessa da una superficie e sono quindi indipendenti dal valore effettivo della specifica emissività della superficie, la superficie deve avere un'emissività relativamente alta (es: $\epsilon > 0.7$), altrimenti le letture assumono un'elevata incertezza, rendendo necessari i sensori a contatto. Meno problematico, invece, è l'utilizzo di sensori a sfioramento per oggetti sottili o materiali a bassa capacità termica.

L'adozione di sensori di temperatura remoti come ad esempio la termocamera ad infrarossi è la tecnica più difficile poiché richiede strumenti molto costosi e le misure sono influenzate sia dall'emissività della superficie sia dall'emissività riflessa da altri oggetti. Tale configurazione ha il grande vantaggio di poter effettuare misure in aree non raggiungibili, come ad esempio un soffitto, senza aver bisogno di ponteggi, ma allo stesso tempo la superficie da indagare deve possedere adeguati valori di emissività

(ad esempio non è possibile per i metalli lucidati) e deve essere opaca alle lunghezze d'onda specifiche della radiazione termica monitorata dallo strumento.

Solitamente per la misura della temperatura i termometri più utilizzati sono a resistenza elettrica (Pt100) sia per le determinazioni della temperatura dell'aria sia delle superfici (Camuffo *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2002; Camuffo *et al.*, 2006; Bernardi *et al.*, 2006; Nava *et al.*, 2010). Meno diffusi sono i termometri a termocoppia (Saafi *et al.*, 2005).

Per ogni tipologia di strumento di misurazione della temperatura, dell'aria e delle superfici, esistono delle specifiche quali l'intervallo di misurazione, l'incertezza, la ripetibilità, la risoluzione, il tempo di risposta e la stabilità nel tempo dei sensori, che devono essere rispettate come requisiti minimi per poter essere considerati conformi alla norma. Tali specifiche sono inserite all'interno della norma UNI EN 15758:2010 a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

Per quanto concerne le procedure e gli strumenti per la misurazione dell'umidità dell'aria e degli scambi di vapor d'acqua tra l'aria e i Beni culturali si deve far riferimento alla norma UNI EN 16242:2013. Seguendo le indicazioni fornite dalla Norma è possibile esprimere l'umidità dell'aria ai fini della diagnosi ambientale per i Beni culturali come umidità relativa, rapporto di mescolanza o titolo dell'aria umida (MR), umidità assoluta e temperatura di rugiada (DP).

L'umidità relativa è un parametro importante in quanto è correlata a molti processi di degrado che insieme ai cambiamenti di temperatura influiscono sulla corretta conservazione dei Beni culturali. La temperatura del punto di rugiada, chiamato comunemente *Dew Point* (DP) è la temperatura alla quale una particella d'aria umida deve essere raffreddata ad una determinata pressione atmosferica e costante contenuto di vapore acqueo in modo che si verifichi la saturazione.

Esso può essere alternativamente definita come la temperatura alla quale la pressione effettiva del vapore contenuto in una particella d'aria è uguale alla pressione di saturazione, a pressione atmosferica costante e Rapporto di mescolanza costante (*Mixing Ratio*) dato dal rapporto tra la massa di vapore acqueo e la massa di aria secca (UNI EN 16242:2013). Le formule empiriche per il

calcolo del *Dew Point* e del rapporto di mescolanza sono riportate nella norma UNI EN 16242:2013 a cui si rimanda per successivi approfondimenti.

I fenomeni di condensazione dell'acqua, molto temuti soprattutto per la conservazione degli affreschi, si formano quando una superficie si raffredda fino a raggiungere il DP: il vapore ambientale comincia a condensare sull'affresco formando piccole goccioline o un film sottile d'acqua. Il fenomeno della condensa superficiale tipicamente contraddistingue il periodo primaverile delle regioni del Mediterraneo, quando l'aria diventa mite e ricca di umidità (cioè con un elevato DP) e soprattutto quando spira il caldo e umido vento di scirocco.

L'interazione tra l'aria avente queste caratteristiche e gli ambienti confinati freddi può generare fenomeni di copiosa condensa. Gli edifici storici, infatti, hanno pareti spesse con elevata capacità ed inerzia termica inerzia termica pertanto la temperatura interna tende a conservare la "memoria" della precedente stagione fredda. Il contrasto tra l'elevato DP dell'aria e la bassa temperatura delle pareti spesse che rimangono sotto il DP può provocare, quindi, rilevanti condensazioni superficiali. Se la superficie è porosa la tensione superficiale può favorire la formazione di condensa nei micropori, anche a temperature superiori del DP (Camuffo, 1998 e 2014).

Per questo motivo in primavera le spesse pareti di edifici non riscaldati possono essere umide. Tale fenomeno può essere quindi contrastato o limitato agendo o sull'aumento della temperatura delle superfici, ad esempio con radiazioni IR o mediante riscaldamento diretto, o riducendo il contenuto di umidità dell'aria. Alcuni risultati positivi possono essere raggiunti anche trattando le superfici con sostanze idrorepellenti che aumentano l'angolo di contatto delle gocce d'acqua e impediscono l'assorbimento di condensa su tali superfici.

Analizzando, quindi, la temperatura di superficie si può valutare se le condizioni di sito sono favorevoli all'evaporazione o alla formazione di condensa. La presenza, tuttavia, di sali solubili nei materiali costituenti le murature abbassano l'andamento dell'umidità RH poiché sottraggono umidità all'aria, di conseguenza la temperatura dell'aria e la temperatura del DP s'innalzano (in base alla formula), mentre in presenza di micropori

la condensa può verificarsi al loro interno in condizioni normali anche in ambienti relativamente asciutti (Camuffo, 2014). Nei corpi porosi, le molecole d'acqua in contatto con il materiale sono adsorbiti e fortemente legati con la superficie interna a causa della presenza di forze polo-dipolo; il legame è così forte che l'acqua è considerata allo stato solido. In pori con raggio inferiore a 0,1 mm tale effetto fisico domina; in pori con raggio maggiore di 1 mm e contaminati da sali solubili, l'effetto fisico-chimico che determina la pressione di equilibrio delle soluzioni può anche causare la condensazione con basso contenuto di umidità (Camuffo, 2014). Pertanto, cicli di condensazione-evaporazione causano la migrazione capillare dei sali disciolti e la cristallizzazione formando efflorescenze e/o sub-efflorescenze in superficie con conseguenti diverse patologie di degrado.

I primi strumenti per la misura dell'umidità dell'aria furono gli igrometri a capello di bassa risoluzione poiché prevedevano errori dell'ordine del 5-10%. Dagli anni Settanta, tali strumenti sono stati sostituiti da altri basati su principi di funzionamento differenti. Tra questi ricordiamo:

1. igrometro per punto di rugiada a specchio raffreddato;
2. psicrometro elettronico;
3. igrometro elettronico con sensore capacitivo;
4. igrometro elettronico con sensore resistivo.

Per il monitoraggio in continuo i più utilizzati sono : 1) gli igrometri con sensore capacitivo e/o resistivo, raccomandati per l'affidabilità dei risultati a lungo termine ed estremamente facili da utilizzare sia in condizioni ambientali estreme che in condizioni di normale utilizzo per interni (Camuffo *et al.*, 2000; Bernardi *et al.*, 2006; Becherini *et al.*, 2010; Camuffo *et al.*, 2010; Nava *et al.*, 2010); 2) psicometri elettronici (Camuffo *et al.*, 1996; Camuffo *et al.*, 2000; Camuffo *et al.*, 2002; Gysel *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2010) composti da due sensori di temperatura a "bulbo asciutto" e a "bulbo umido" in grado di fornire una misura accurata rispetto ai sensori di umidità, ma questi necessitano di tarature periodiche e accortezze relative al mantenimento del serbatoio d'acqua e alla schermatura dei sensori e che li rendono poco utilizzati per il monitoraggio a lungo termine.

Per ogni tipologia di strumento di misurazione dell'umidità dell'aria è necessario tarare periodicamente i sensori secondo le specifiche raccomandazioni che riportano anche i requisiti minimi di conformità quali l'intervallo di misurazione, l'incertezza, la ripetibilità, la risoluzione, la costante di tempo dello strumento in aria calda e la stabilità nel tempo dei sensori (UNI EN 16242:2013).

7 – Conclusioni

Il monitoraggio microclimatico è uno strumento applicato da più di quarant'anni per determinare l'impatto dei fattori ambientali, naturali e artificiali, che agiscono congiuntamente sul Patrimonio Culturale.

Negli ultimi decenni si è assistito a uno sviluppo del monitoraggio microclimatico grazie all'uso di nuove tecnologie *hardware* e *software* per la raccolta e l'elaborazione dei dati e soprattutto grazie alla regolamentazione dal punto di vista normativo sia a livello nazionale sia europeo, con la stesura delle procedure UNI e UNI EN per la conservazione del Patrimonio Culturale.

Ad oggi i numerosi studi effettuati sia in condizioni *indoor* sia *outdoor* hanno consentito di fornire indicazioni utili per la corretta conservazione del Patrimonio Culturale. Nonostante ciò il monitoraggio resta ancora una prassi ed una metodologia poco diffusa soprattutto a causa dei costi elevati sia di installazione della strumentazione sia di gestione degli impianti stessi.

È evidente che lo stato di conservazione dei manufatti è controllato da fattori ambientali, ma la valutazione dei parametri in gioco dipende dalla tipologia di bene che si vuole conservare e monitorare, dal contesto in cui esso si trova e dalla costituzione materica dello stesso. Pertanto c'è bisogno anche di figure professionali capaci di valutare gli stati di rischio a cui il bene può essere sottoposto, i parametri da monitorare e scegliere i sistemi adatti caso per caso.

Inoltre, la complessità della conservazione del Patrimonio Culturale implica il coinvolgimento di tutte le professionalità e competenze interessate, dalle Soprintendenze, ai restauratori ecc., che oltre a definire le corrette strategie di conservazione devono

anche considerare gli aspetti micro-climatici degli ambienti in cui sono conservati i beni.

La realizzazione di un ambiente "idoneo" alla conservazione, non è sicuramente un problema di soluzione immediata, ciò nonostante occorre fornire agli operatori del settore protocolli operativi semplici e strumenti idonei in grado di monitorare le variabili in gioco.

Per ridurre gli ostacoli che impediscono la diffusione a grande scala del monitoraggio microclimatico, le prospettive per il futuro impongono la diffusione di sistemi a basso costo e *user-friendly*, opportunamente realizzati con *hardware* e *software open source* che possano essere adattati a diversi contesti di monitoraggio. Con il Progetto PRO_CULT, all'interno della tematica "*Tecniche innovative per il monitoraggio del degrado materico del patrimonio architettonico e monumentale*" è stato avviato un percorso di conoscenza e ricerca sviluppato proprio in questa direzione e con l'auspicio che in futuro si possano realizzare e brevettare sistemi di facile gestione e soprattutto dai costi contenuti.

Bibliografia

Angelini E., Grassini S., Corbellini S., Parvis M., Plantanida M., *A multidisciplinary approach for the conservation of a building of the seventeenth century*. Applied Physics 100 (2010), 763-769, DOI 10.1007/s00339-010-5654-8.

Becherini F., Bernardi A., Frassoldati E., *Microclimate inside a semi-confined environment: Valuation of suitability for the conservation of heritage materials*. Journal of Cultural Heritage 11 (2010), 471-476.

Bernardi A., Camuffo D., Del Monte M., Sabbioni C., *Microclimate and weathering of an historical building: the Ducal Palace in Urbino*. Science Total Environment 46 (1985), 243-260.

Bernardi A., Camuffo D., *Uffizi gallery in Florence: a comparison between two different air conditioning systems*. Science and Technology for Cultural Heritage 4 (2) (1995a), 11-22.

Bernardi A., Camuffo D., *Microclimate in the Chiericati palace municipal museum, Vicenza*. Museum Management and Curatorship 14 (1995b), 5-18.

Bernardi A., Becherini F., Bassato G., Bellio M., *Condensation on ancient stained glass windows and efficiency of protective glazing systems: two French case studies, Sainte-Chapelle (Paris) and Saint-Urbain Basilica (Troyes)*. Journal of Cultural Heritage 7 (2006) 71-78.

Bernardi A., Todorov V., Hiristova J., *Microclimatic analysis in St. Stephan's church, Nessebar, Bulgaria after interventions for the conservation of frescoes*. Journal of Cultural Heritage 1 (2000), 281-286.

Brimblecombe P., Blades N., Camuffo D., Sturaro G., Valentino A., Gysels K., Van Grieten R., Busse H.J., Kim O., Ulrych U. and Wieser M., *The Indoor Environment of a Modern Museum Building, the Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich. UK*. Indoor Air. 9 (1999), 146-164.

Camuffo D., *Hot-Horse Anemometry*. Atmospheric Environment, 15 (1981).

Camuffo D., *Escursioni termiche dei cavalli di S.Marco nel periodo estivo*. Inquinamento, 7/8 (1980), 57-61.

Camuffo D., *Deterioration processes of historical buildings*. In: Schneider, T. (Ed.), *Acidification and Its Policy Implications*. Elsevier, Amsterdam, (1986), 189-221.

Camuffo D., *Environment and microclimate*. In: Baer, N., Sabbioni, C., Sors, A. (Eds.), *Science Technology and European Cultural Heritage*. Butterworth, Oxford, (1991), 37-50.

Camuffo D. and Bernardi A., *Microclimatic Factors affecting the Trajan Column*. The Science of the Total Environment, 128 (1993), 227-255

Camuffo D., *Effects of air pollution on historic buildings and monuments. Scientific basis for conservation: case studies in the deterioration of stone monuments in Italy*. European Cultural Heritage Newsletter on Research 8 (1) (1994), 7-15.

Camuffo D., *Microclimate for Cultural Heritage. Developments in Atmospheric Science*, Elsevier, Amsterdam, 1998.

Camuffo D., *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*. Elsevier, 2014.

Camuffo D., Bernardi A., *The microclimate of Leonardo's "Last Supper"*, joint edition European Cultural Heritage Newsletter on Research, and Bollettino Geofisico, special issue, 14 (3) (1991a). 1-123.

Camuffo D., Bernardi A., *Indoor and outdoor microclimate: the Trajan Column and Sistine Chapel*. In: Baer, N., Sabbioni, C., Sors, A. (Eds.), *Science Technology and European Cultural Heritage*. Butterworth, Oxford, (1991b), 295-305.

Camuffo D., Bernardi A., *Microclimatic factors affecting the Trajan Column*. Science Total Environment 128 (1993), 227-255.

Camuffo D., Bernardi A., *The microclimate of the Sistine Chapel*, joint edition European Cultural Heritage Newsletter on Research, 9, 7—32 and Bollettino Geofisico, 18 (2) (1995a), 7-32.

Camuffo D., Bernardi A., *Study of the microclimate of the giant hall of the Da Carrara's Royal Palace, Padova*. Studies in Conservation 40(1995b), 237-249.

Camuffo D., Bernardi A., *Deposition of urban pollution on the Ara Pacis, Rome*. Science Total Environment 189/190 (1996), 235-245.

Camuffo D., Bernardi A., *Controlling the microclimate and the particulate matter inside the historic anatomie theatre, Padova*. Museum Management and Curatorship 15 (1997), 285-298.

Camuffo D., Vincenzi S., *Computing the Energy Balance of a Statue of Bronze: the San Marco's Horses as a Case Study*. The Science of the Total Environment, 44 (1985), 147-158.

Camuffo D., Vincenzi S., Pilan L., *A first-order analysis of the heat wave in the soil*. Water, Air and Soil Pollution 23 (1984), 441-454.

Camuffo D., Bernardi A., *Microclimate and interactions between atmosphere and the Orvieto Cathedral*. Science Total Environment 64 (1988), 1-10.

Camuffo D., Sturaro G., Valentino A., *Urban Climatology Applied to the Deterioration of the Pisa Leaning Tower, Italy*. Theoretical and Applied Climatology 63 (1999), 223-231.

Camuffo D., Van Grieken R., Busse, H-J., Sturaro G., Valentino A., Bernardi A., Blades N., Shooter D., Gysels K., Deutsch F., Wieser M., Kim O., Ulrych U., *Environmental monitoring in four European museums*. Atmospheric Environment 35 Supplement No. 1 (2001), S127-S140.

Camuffo D., Bernardi A., Sturaro G., Valentino A., *The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence*. Journal of Cultural Heritage 3 (2002) 155-161.

Camuffo D., Sturaro G. and Valentino A., *Urban Climatology Applied to the Deterioration of the Pisa Leaning Tower, Italy*, Theoretical and Applied Climatology, 63 (1999), 223-231.

Camuffo D., Sturaro G., Valentino A., *Showcases: a really effective mean for protecting artworks?* Thermochimica Acta 365 (2000) 65-77.

Camuffo D., Pagan E., Rissanen S., Bratasz t., Koztowski R., Camuffo M., Della Valle A., *An advanced church heating system favourable to artworks: a contribution to European standardisation*. Journal of Cultural Heritage 11 (2010), 205-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culturher.2009.02.008>.

Camuffo D., Schenal, P., *Microclima all'interno della Cappella degli Scrovegni scambi termodinamici tra gli affreschi e l'ambiente*. In: Ministero dei Beni Culturali ed Ambientali "Giotto a Padova", Special issue of Bollettino d'Arte. Poligrafico dello Stato, Rome, (1982), 107-209.

Caneva G., *Aspetti biologici nel degrado dei materiali lapidei*. In "Castrā ipsa possunt et debent reparari", Indagini Conoscitive e Metodologiche di Restauro delle Strutture Castellane Normanno-Sveve. Atti del Convegno Internazionale di Studio promosso dall'Istituto internazionale di Studi Federiciani, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Castello di Lagopesole, 16-19 ottobre 1997, tomo II (1997), 497-512.

Cardinale N., Ruggiero F., *A case study on the environmental measures techniques for the conservation in the vernacular settlements in Southern Italy*. Building and Environment 37 (2002), 405-414.

Colston B.J., Watt D.S., Munro H.L., *Environmentally-induced stone decay: the cumulative effects of crystallization-hydration cycles on a Lincolnshire oolite limestone*. Journal of Cultural Heritage 4 (2001), 297-307.

Corgnati S.P., Filippi M., *Assessment of thermo-hygrometric quality in museums: Method and in-field application to the "Duccio di Buoninsegna" exhibition at Santa Maria della Scala (Siena, Italy)*. Journal of Cultural Heritage 11 (2010) 345-349.

DGR n.309 del 3 Marzo 2003 - Regione Emilia Romagna. Bollettino ufficiale della Regione Emilia-Romagna" n. 56 del 17 aprile 2003.

D.M. 10 maggio 2001, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei* (Art. 150, comma 6, del D.Les. n. 112 del 1998) G.U. (19 ottobre 2001), n. 244, S.O. 19 pp.

D.M. 11 novembre 2005, *Protocollo di intesa tra la direzione regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Toscana e La Regione Toscana*. (2005) 4pp.

Ghedini N., Ozga I., Bonazza A., Dilillo M., Cachier H., Sabbioni C., *Atmospheric aerosol monitoring as a strategy for the preventive conservation of urban monumental heritage: The Florence Baptistery*. Atmospheric Environment 45 (2011), 5979-5987.

Gysels K., Delalieux F., Deutsch F., Van Grieken R., Camuffo D., Bernardi A., Sturaro G., Busse H.J., Wieser M., *Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium*. Journal of Cultural Heritage 5 (2004), 221-230.

Garcia-Diego F.J., Zarzo M., *Microclimate monitoring by multivariate statistical control: The renaissance frescoes of the Cathedral of Valencia (Spain)*. Journal of Cultural Heritage 1 (2010), 339-344.

Liu B., Chen X., Fang D., Perrone A., Pispas S., Vainoa N.A., *Environmental monitoring by thin film nanocomposite sensors for cultural heritage preservation*. Journal of Alloys and Compounds 504S (2010), S405-S409.

Mandrioli P., Sabbioni C., Bonazza A., De Nuntiis P., Guaraldi C., Ozga I., Pili F., *Indagini sulle condizioni ambientali del Camposanto di*

Pisa: analisi microclimatiche. Atti in " Il Camposanto di Pisa: un progetto di restauro integrato, Pisa, 6 -8 Marzo (2008), 59-64.

Nava S., Becherini F., Bernardi A., Bonazza A., Chiari M., García-Orellana I., Lucarelli F., Ludwig N., Migliori A., Sabbioni C., Udisti R., Valli G., Vecchi R., *An integrated approach to assess air pollution threats to cultural heritage in a semi-confined environment: The case study of Michelozzo's Courtyard in Florence (Italy)*. Science of the Total Environment 408 (2010), 1403-1413.

Ponziani D., Ferrero E., Appolonia L., Migliorini S., *Effects of temperature and humidity excursions and wind exposure on the arch of Augustus in Aosta*. Journal of Cultural Heritage 13 (2012), 462-468.

Saafi M., Romine P., *Preliminary evaluation of MEMS devices for early age concrete property monitoring*. Cement and Concrete Research 35 (2005), 2158-2164.

Sawdy A. & Price C., *Salt damage at Cleeve Abbey, England*. Part I: a comparison of theoretical predictions and practical observations. Journal of Cultural Heritage 6 (2004), 125-135.

Sedlbauer K., *Prediction of mould growth by hygrothermal calculation*. Journal of Building Physics 25 (2002), 321-336.

Sedlbauer K., Hofbauer W., Krueger N., Mayer F., Breuer K., *Material specific isopleth-systems as valuable tools for the assessment of the durability of building materials against mould infestation the "isopleth-traffic light"*. In: Proceedings of the XII DBMC, International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto, Portugal (2011), 8.

Thomson G., *The museum environment*. London: Butterworth-Heinemann. First edition, (1978).

Thompson G., *The Museum Environment*, 2nd Edition. (Butterworth-Heinemann Series in Conservation and Museology), Routledge, London, (1986).

UNI 10586, *Documentazione. Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, (1997).

UNI 10829, *Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, (1999).

UNI EN 15757, *Conservazione dei Beni Culturali - Specifiche concernenti la temperatura e l'umidità relativa per limitare i danni meccanici causati dal clima ai materiali organici igroscopici*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, (2010).

UNI EN 15758, *Conservazione dei Beni Culturali - Procedure e strumenti per misurare la temperatura dell'aria e quella della superficie degli oggetti*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, (2010).

UNI EN 16242, Conservazione dei beni culturali - Procedure e strumenti per misurare l'umidità dell'aria e gli scambi di vapore tra l'aria e i beni culturali, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, (2013).

Zarzo M., Fernández-Navajas A., García-Diego F.J., Long-Term Monitoring of Fresco Paintings in the Cathedral of Valencia (Spain) through Humidity and Temperature Sensors in Various Locations for Preventive Conservation. *Sensors*. 11 (2011) 8685–8710.